

南黄海古生代盆地原型演变与烃源岩发育特征

朱伟林¹, 陈春峰², 张伯成², 万延周², 付晓伟¹, 张银国³

(1. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 2 中海石油(中国)有限公司 上海分公司, 上海 200335;
3. 中国地质调查局 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 钻井及露头证实下扬子陆区发育下寒武统幕府山组、上奥陶统五峰组—下志留统高家边组、二叠系 3 套烃源岩。盆地发育时期的动力学环境决定该时期的盆地原型, 盆地原型影响盆内岩相及烃源岩展布。幕府山组沉积时期, 南黄海盆地表现为张裂背景下的被动陆缘克拉通盆地, 盆地相及深水陆棚相呈环带状围绕古隆起或台地发育, 为烃源岩发育优势相带, 推测南黄海盆地中部隆起及北部幕府山组烃源岩发育较好; 五峰组—高家边组沉积时期, 南黄海盆地表现为挤压背景下的前陆盆地, 盆地相、斜坡相、深水陆棚相由西北向东南依次呈条带状分布, 盆地相、深水陆棚相为烃源岩发育优势相带, 预测五峰组—高家边组烃源岩主要在南黄海地区中北部发育且有一定厚度; 上二叠统龙潭组沉积时期, 南黄海盆地表现为挤压背景下的活动大陆边缘坳陷型盆地, 在该盆地中各沉积相带呈环带状分布, 三角洲相、潮坪相、沼泽相为烃源岩发育优势相带, 发育龙潭组品质中等—好的烃源岩; 预测龙潭组烃源岩在南黄海盆地中部发育, 是南黄海盆地古生界的次要烃源岩。

关键词: 烃源岩; 岩相古地理; 盆地原型; 南黄海盆地

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

Paleozoic basin prototype evolution and source rock development in the South Yellow Sea

ZHU Weilin¹, CHEN Chunfeng², ZHANG Bocheng², WAN Yanzhou², FU Xiaowei¹, ZHANG Yinguo³

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Branch of CNOOC China Ltd., Shanghai 200335, China;

3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: Drill samples and outcrops confirmed that three sets of source rocks developed in the Lower Yangtze Block area, namely, the Lower Cambrian Mufushan Formation, the Upper Ordovician Wufeng Formation—the Lower Silurian Gaojiabian Formation, and the Permian. This tectonic environment determined the evolution of the basin, which then affected the distribution of lithofacies and source rocks. During the deposition of the Lower Cambrian Mufushan Formation, the South Yellow Sea Basin was a passive continental cratonic margin basin undergoing regional extension. The basin facies and deep-water shelf facies developed around the paleo-uplift or platform, which were the dominant facies for the development of source rocks. It was predicted that this set of source rock developed well in the Middle Uplift and the northern part of the South Yellow Sea Basin. During the depositing of Wufeng and Gaojiabian formations, the South Yellow Sea Basin was a compressional foreland basin. The basin facies, slope facies and deep-water shelf facies were distributed in strips from the northwest to the southeast of Lower Yangtze area. The basin facies and deep-water shelf facies were dominant facies in which source rocks developed well. It was predicted that the source rocks of Wufeng—Gaojiabian formations were distributed mainly in the middle and north part of the South Yellow Sea Basin. During the deposition of the Upper Permian Longtan Formation, the South Yellow Sea Basin experienced active continental margin convergence. The sedimentary facies in the basin were scattered in ring belts. Delta and tidal flat facies were dominant with moderate to good quality source rocks. It was predicted that the source rocks of the Longtan Formation developed in the middle part of the South Yellow Sea Basin, which was the secondary source rock of Paleozoic in the South Yellow Sea Basin.

Key words: source rock; lithofacies and paleogeography; basin prototype; South Yellow Sea Basin

收稿日期: 2020-06-01; 修订日期: 2020-07-20。

作者简介: 朱伟林 (1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事海洋地质和石油地质研究。E-mail: zhuwl@cnooc.com.cn。

基金项目: 中国—东盟海上合作基金项目 (12120100500017001) 资助。

南黄海盆地位于南黄海海域,盆地内从北向南依次为北部拗陷、中部隆起、南部拗陷和勿南沙隆起(图1)。经过60多年不懈的努力,特别是自2006年以来,中海油及青岛海洋地质研究所在南黄海开展了大量勘探攻关及钻探,在中部隆起获得了品质较好的地震资料,WX5井及CSDP-2井钻遇上古生界及下古生界志留系,发现40余处油气显示,证实南黄海盆地发育二叠系烃源岩,但该井未钻遇下古生界烃源岩^[1-4]。中、古生代海相沉积在南黄海盆地内广泛发育,可能发育下寒武统幕府山组、下志留统高家边组、下二叠统、上二叠统4套烃源岩^[1,5-6]。对下扬子陆区烃源岩的研究表明^[7-8],下寒武统牛蹄塘组(层位对应幕府山组)和下志留统高家边组是海相古生界的主力烃源岩,二叠系烃源岩是次要烃源岩。由于南黄海盆地目前尚无钻井钻遇幕府山组及高家边组烃源岩,而这两套烃源岩的发育情况对南黄海盆地的勘探潜力及方向影响极大,因此,南黄海古生界烃源岩的发育程度及展布问题是目前急需解决的重大地质问题。

在下扬子陆区有较多钻井及露头等资料,尽管前人对下扬子陆区3套烃源岩的岩相古地理已进行了一定研究^[9-11],但还很难判断南黄海古生代烃源岩的发育情况。本文从分析烃源岩的发育环境及控制烃源岩展布的地质因素出发,如烃源岩发育时的大地构造环境、盆地类型及沉积相带等,研究下扬子陆区及南黄海盆地下寒武统幕府山组、上奥陶统五峰组一下志留统高家边组、上二叠统龙潭组

3套烃源岩的发育特征及其影响因素,预测南黄海盆地古生界烃源岩发育情况。

1 影响烃源岩发育及展布的因素

1.1 优质烃源岩发育在特定沉积相带

对中国南方及塔里木盆地古生界海相烃源岩的研究表明^[12],烃源岩形成时表层水的高有机质生产力与底层水的缺氧保存环境同样重要,或者说应同时具备。这两大条件则由不同地质时代、不同气候环境及不同地质条件下众多的因素组合形成。在有机质的高生产力方面,石炭纪—二叠纪全球大气氧含量处于中等水平,非常有利于煤系烃源岩的形成;而寒武纪我国四川盆地及塔里木盆地处于副热带高压控制下,易形成洋流辐散带,富含营养盐的辐散带上升洋流同样也有利于形成有机质高生产力。在有机质的保存方面,多种条件下均可形成安静、缺氧水体,有利于有机物保存,如寒武纪早期冰川快速消融引起的全球性海平面上升、盆地快速张裂形成的欠补偿盆地、长期稳定发育的深水盆地、蒸发潟湖内水体含盐量上升而形成的水体分层等。

烃源岩发育的沉积相及岩相古地理环境则是上述有利于烃源岩发育的各种因素的具体组合。张水昌等^[12]提出中国古生代海相高有机质丰度烃源岩主要发育的沉积相有欠补偿盆地相、陆源海湾相、蒸发潟湖相、台缘内缓坡、浅缓坡、深缓坡,以及半闭塞—闭塞欠补偿海湾相。梁狄刚等^[13]对中国南方古生界4套烃源岩的沉积相研究后,提出优质烃源岩发育的7种沉积相:深水泥质陆棚相、深水热水陆棚相、深水碳酸盐岩陆棚相、深水硅磷质台凹相、海湾潟湖相、近海湖盆沼泽相和前三三角洲相。以深水陆棚相为例,该相带主要发育在四川盆地及下扬子区的早寒武世或早志留世深水泥质陆棚,泥岩中的大量浮游类红藻、褐藻提供了丰富的有机质来源,而富含黄铁矿、具水平层理的纹层状灰色泥岩指示还原的有机质保存环境。对全球主要的海相盆地烃源岩与其沉积环境研究表明^[14],波斯湾、西西伯利亚、墨西哥湾、北海、大西洋、东非海岸、四川、塔里木和古特提斯洋等盆地的优质烃源岩形成时都具有海湾或与海湾地貌类似的沉积环境,即三面是陆地,与海湾相连的河流提供大量矿物质成为藻类等水生生物的主要营养物质,同时由于海湾水体安静或盐度上升有利于有机质保存,从而有利于形成优质烃源岩。

烃源岩是否发育与特定沉积相存在较强联系。优质烃源岩发育的沉积相主要以深水欠补偿盆地、

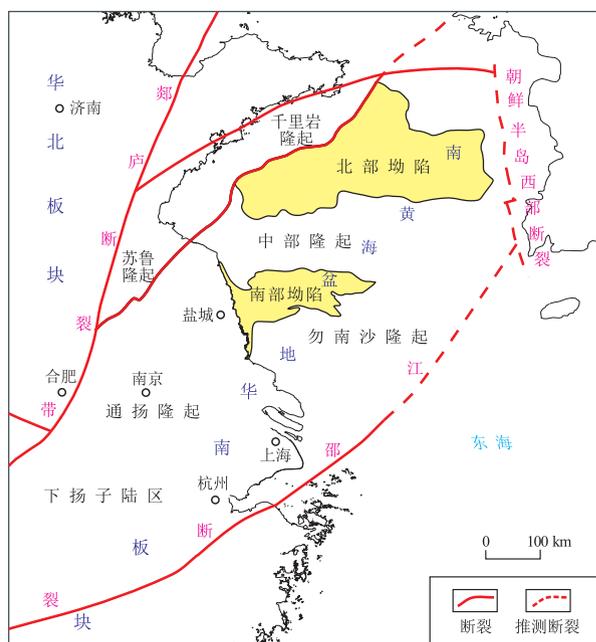


图1 南黄海盆地位置

Fig.1 Location of South Yellow Sea Basin

海湾、蒸发潟湖等相带为主,这些相带内既有相对安静或盐度较高的水体以形成良好的保存条件,同时也具有高生产力这一特性,如接近陆源营养物质输入源或海盆内本身具有丰富的浮游藻类、底栖生物等;而仅有保存条件或仅有高的生产力的相带,是无法形成优质烃源岩的,如在中国南方寒武系沉积中存在远洋深水盆地相,尽管保存条件好,但有机质生产力却较低,只能形成有机质含量低的暗色泥岩;再比如在中下扬子区石炭系发育厚层的碳酸盐岩台地相沉积,可见丰富的生物化石,但由于台地相水体动荡且水体较浅,缺少保存条件,因而在台地相沉积中几乎找不到烃源岩(个别台地内发育蒸发潟湖相,水体安静,也可发育烃源岩)。

1.2 盆地类型控制沉积相带展布

盆地类型对烃源岩的发育具有控制作用。对中国古生代海相烃源岩的研究发现^[12],海相烃源岩的发育程度与盆地类型之间存在密切联系,其中高有机质丰度烃源岩主要发育于被动大陆边缘盆地、克拉通内拗陷盆地和前陆盆地这3类盆地中。对环大西洋的北美、西非等多个近海富油气盆地研究表明^[15-18],环大西洋两岸优质烃源岩的发育程度及展布受到大西洋张裂作用的控制,并且主要在被动陆缘盆地中。此项研究成果已应用到近几年中海油的海外勘探中,据此预测了优质烃源岩的主要发育区及未来可能发现大型油气田的探区,获得了良好的勘探效果,在南美洲深水区发现了数个亿吨级的巨型油田^[19]。

盆地类型影响沉积相带的展布。扬子区发育海相烃源岩的盆地类型对沉积相带的平面展布有极强的控制作用^[13]。在早寒武世,中国南方发育克拉通边缘盆地及洋盆,克拉通边缘盆地中的沉积相带格局为多个古隆起中间分布浅水陆棚及深水陆棚,向边缘为盆地相,发育优质烃源岩深水陆棚及浅水陆棚,呈环带状围绕古隆起分布。在早志留世,中国南方主要发育前陆盆地,盆地中斜坡部位烃源岩不发育,只有前陆拗陷带发育优质烃源岩,呈长条形分布,且其长轴方向与前陆拗陷带长轴方向一致。四川盆地二叠系的烃源岩分布同样受盆地类型控制,早二叠世末期东吴运动造成盆地西南部形成康滇古陆;在龙潭组(吴家坪组)沉积时期,受区域拉张影响,盆地东北部形成克拉通边缘盆地,向北为南秦岭裂谷盆地(海盆)及北秦岭隆起^[20-21];在晚二叠世海侵背景下,在克拉通边缘盆地内由西南向东北方向水深加大,形成近北西向展布的环带状相带,依次为河流相、滨岸沼泽相、潮坪

潟湖相、浅水陆棚相、开阔台地相、深水陆棚相和盆地相^[22];盆地内优质烃源岩发育的相带主要为深水陆棚相、浅水陆棚相、潮坪—潟湖相带^[22],且呈环带状分布,可见,晚二叠世四川盆地的构造活动形成该区克拉通边缘盆地及相应的环带状岩相古地理格局,而岩相古地理格局又影响到烃源岩围绕古隆起呈环带的分布格局。

综合上述,不同的大地构造环境会形成不同类型的盆地,对于某一类型的盆地,其沉积相带的发育和展布也有特定的规律。同时,优质烃源岩的发育与特定的沉积相带密切联系。因此,盆地形成的大地构造环境及盆地类型与烃源岩的发育与展布相带密切相关。

如何对低勘探程度区烃源岩的发育程度及展布进行预测呢?朱夏等对盆地原型的划分及盆地沉积发育的控制作用进行了大量深入的研究,并建立了沉积盆地“T-S-M”分析理论和方法^[20,23-25]。朱夏指出,盆地原型是地质发展历史一定阶段、一定运动体制下形成的大地构造单元,不同的盆地原型对应不同的动力学环境^[23],同时指出,在油气普查工作中,我们所面临的往往是预测性的而不是总结性的问题,因此我们要从一些地质因素对这些指标进行评价,根据3个“T”对4个“S”和4个“M”进行评价,其中就包括根据盆地动力学环境(tectonics)、盆地原型研究结果对沉积作用(sediment)、烃源岩发育条件(material)等未知因素进行研究和预测。

因此,运用朱夏提出的“T-S-M”理论,结合利用盆地类型来分析烃源岩的研究方法,从沉积盆地的动力学环境出发,确定该时期的盆地原型,进而依据已有钻井资料分析该时期烃源岩发育的优势相带及岩相展布规律,最后在平面上预测烃源岩发育的优势区,这是一条研究烃源岩优势发育区、评价含油气远景区的有效技术路线。

2 古生代烃源岩发育期盆地原型

2.1 早寒武世盆地原型

扬子区结晶基底形成于晋宁运动早期,晋宁运动发生时间大约为中元古代末期,即距今约1 000~750 Ma,在下扬子—南黄海区主要表现为2期造山性质的运动:早期的四堡运动表现为周缘地体向扬子古陆核上的拼贴;晚期的晋宁运动表现为南面的华夏地块往扬子古陆核下的俯冲,以及扬子古陆核北缘向华北板块下的俯冲^[19]。晋宁运动之后的俯冲作用在下扬子古陆核南北两面形成两个火山岛

弧,导致下扬子板块横向增生^[26]。根据现今残留的晋宁期花岗岩分布特征勾划出一个围绕下扬子周缘形成的花岗岩或火山岩构造带,分别出露在扬子板块南缘的江南隆起带边缘及北缘的苏鲁地区、张八岭地区、大别造山带等^[27]。两个火山岛弧在新元古代固结为统一的下扬子区结晶基底。

自晋宁期罗迪尼亚超大陆张裂至寒武纪,华南一直作为独立的大陆,周缘无明显造山带^[28]。YAO等^[29]通过物源分析认为,华南东南缘在寒武纪早期已经开始接收来自印度大陆的碎屑物质。沉积记录显示,震旦纪开始在拉张背景下发生大规模海侵,主要发育以碳酸盐岩为主的沉积,局部存在深水复理石发育的拗陷带,总体表现为陆块离散的拉张格局^[21],其盆地原型为被动大陆边缘的克拉通盆地(图2)。震旦纪—中奥陶世,下扬子—南黄海地区同样也是在拉张的背景下发育了为被动大陆边缘的克拉通盆地^[21,30]。

2.2 晚奥陶世—早志留世盆地原型

华南与扬子陆块聚合发生于新元古代(820~805 Ma),碰撞拼贴带为江南造山带,但碰撞的过程和方式存在一定争议^[33-34];另外,在华南板块内部并未发现与加里东期岛弧相关的岩浆活动^[35]。寒武纪—早志留世,碎屑岩沉积区范围由华南东南向扬子方向逐渐迁移,显示华南板块在加里东期已成为一体,并具有同样的演代趋势^[35-36]。扬子与华夏作为统一的华南板块,在早古生代晚期与冈瓦纳大陆聚合,导致在华南板块东南一带碰撞并发生强烈的造山运动,从而在早古生代晚期形成华南板块的前陆盆地^[29,35,37]。浙西北陈蔡杂岩韧

性变形研究表明,该时期发生了强烈的北西向逆冲挤压^[38]。下扬子区加里东运动从奥陶纪末期启动,具多幕式特征,最强烈的一幕发生于志留纪,下扬子陆区—南黄海地区受华南块体由东南向西北挤压影响,形成一个前陆盆地^[39](图2),整体上呈南东高、北西低的格局。南黄海 CSDP-2 井钻遇 158.2 m 厚的高家边组上部陆棚相灰黑色泥岩^[40],岩性也与下扬子陆域类似,显示南黄海与邻近的苏北陆域处于前陆盆地的相似构造位置。

2.3 二叠纪龙潭期盆地原型

早期研究认为,扬子板块自晚二叠世开始向华北板块俯冲碰撞,在二者之间最终形成秦岭—大别—苏鲁造山带,即印支运动。上二叠统龙潭组沉积时期属于印支运动早期^[41]。

近年研究证实,华南与华北的碰撞要早得多。同位素测年及岩相古地理分析表明,两者碰撞始于 258 Ma,苏鲁段率先碰撞再逐渐向西扩展,碰撞过程中,苏鲁段沿郯庐断裂发生大规模走滑^[31],这一点与从具有陆壳亲源性的超高压榴辉岩获得的 256 Ma 的年龄极为接近^[42]。同样,榴辉岩在同一时间也表现出洋壳亲源性和陆壳亲源性特征,表明从洋壳俯冲转为陆壳俯冲的时间可能可以追溯至 ~260 Ma^[43]。需要指出的是,这些年龄并不代表两陆块初始接触的时间,而是代表了强烈相互作用的时间,应滞后于陆块初始接触的时间^[44]。所以在晚二叠世,华南板块与华北板块已碰撞,下扬子—南黄海地区的盆地原型已不是早期的被动大陆边缘盆地,而是受到华南向华北俯冲影响盆地类型。

沉积物源显示,南黄海盆地在二叠纪已具有活动构造背景。从南黄海中部隆起区 CSDP-2 井志留系—石炭系砂岩物源分析来看,该地层的砂岩主要形成于被动大陆边缘和大陆岛弧相关沉积盆地,其母岩应该来自成熟大陆石英质、古老造山带或大陆块地区,推测其来源主要为扬子陆块南部的华夏古陆。同时对该井砂岩的地球化学特征研究发现,志留系坟头组和泥盆系五通组的稀土元素配分模式基本相同,说明研究区在志留纪末期受广西运动影响一度抬升,但是并未经历强烈的构造变形,自坟头组到五通组研究区物源未发生本质变更。对下扬子巢湖和南京地区坟头组和五通组砂岩的研究发现,二者具有相似的碎屑锆石年龄分布模式(主峰为 465~420 和 838~812 Ma)^[45],表明泥盆纪沉积继承了志留纪沉积的物源特征。CSDP-2 井石炭系高骊山组的各项物源判别指示与泥盆纪、

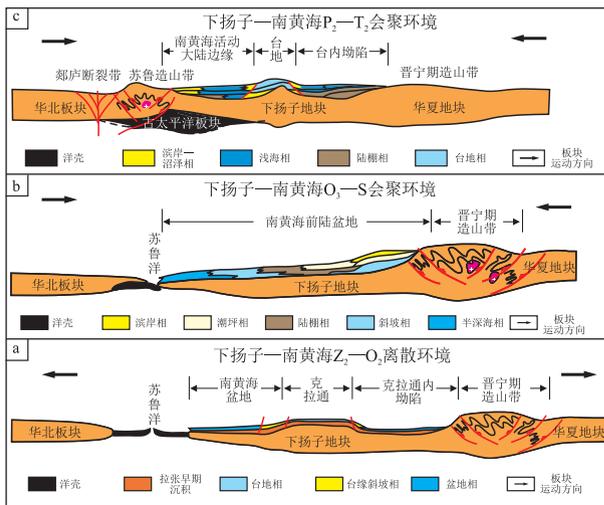


图2 南黄海地区古生代盆地原型类型
据文献[1,30-32]修改。

Fig.2 Paleozoic basin type in South Yellow Sea area

志留纪的物源背景相似,说明下扬子南黄海盆地石炭纪沉积物源继承了早前的物源特征,并无明显变化。CSDP-2井龙潭组的沉积物源则与该井志留系、泥盆系、石炭系砂岩的物源明显不同,龙潭组沉积物源区除了具有大陆岛弧和被动大陆边缘属性外,还显现活动大陆边缘构造属性;微量元素物源判别图解显示,二叠纪的沉积源区与志留纪—石炭纪相比更接近活动大陆边缘区^[40]。由此可见,南黄海二叠系的物源区性质比前二叠纪沉积物更具活动构造背景。可能该时期的南黄海地区已开始接受来自北部碰撞带的物源。

古地磁数据分析认为,下扬子区华南板块与华北板块以旋转的方式完成拼合。李三忠等^[32]认为华南与华北通过双向俯冲的方式完成拼合——在中上扬子区,扬子板块以俯冲方式消失在华北板块下部;而在下扬子区,由于古太平洋板块已经俯冲在华北板块下部,所以该区扬子板块只能“骑”在古太平洋板块上方,以陆—陆碰撞方式与华北板块接触。受下部古太平洋板块向东北方向走滑的影响,苏北—南黄海区域的下扬子区地壳沿郯庐断裂带、苏鲁造山带一带向东北方向滑移并与华北板块拼接,形成小规模造山带。

因此,综合以上大地构造及物源研究认为,龙潭组沉积时期苏北—南黄海区域的下扬子区既不是典型的被动大陆边缘盆地(图2),也不是B-型俯冲形成的前陆盆地,而是陆—陆碰撞形成的活动大陆边缘盆地特征。

3 早寒武世古地理环境与烃源岩发育

3.1 早寒武世岩相古地理

与晚震旦世灯影期相比,下扬子陆区—南黄海地区在早寒武世处于拉张背景下,形成克拉通边缘盆地,同时早寒武世全球海平面持续上升,海平面相对较高,海域范围扩张较大,陆地面积大量减少。该时期下扬子陆区—南黄海地区大部分处于深水陆棚沉积环境,局部为浅水陆棚,在下扬子区的西北部和中部出现较深水的盆地相沉积,在南部边缘局部见三角洲沉积,晚震旦世灯影期形成的台地在早寒武世已变为浅水陆棚。总体上,该时期的沉积格局是围绕早期形成的台地沉积(可能为晋宁运动形成的古隆起区)由于拉张而形成的数个深水盆地沉积,二者之间形成深水陆棚相沉积(图3)。

盆地相:主要为两个区域,一个是在研究区中部景德镇—黄山近北东向的条带;另一个以巢湖为中心,在巢湖、宣城等地区可见硅质岩、硅质页岩等

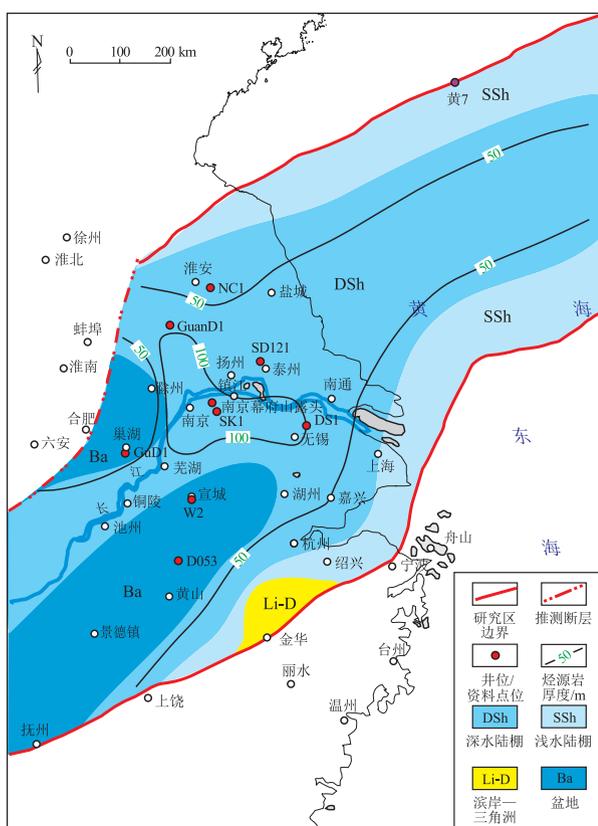


图3 下扬子—南黄海下寒武统幕府山组岩相及烃源岩分布
Fig.3 Lithofacies and source rock distribution of Lower Cambrian Mufushan Formation, Lower Yangtze and South Yellow Sea

深水相沉积,局部有生物礁裸露,云岩下部见核形石,盆地相范围较早期扩张。研究区中部景德镇—黄山近北东向深水沉积岩性主要以黄绿色、灰色泥页岩、碳质页岩及硅质页岩为主,盆地相沉积沿NE—SW向对称两侧扩张。另一个盆地相沉积在巢湖市西南方向的GuD1井钻遇,为深灰色白云岩、硅质白云岩,底部见灰色泥岩,综合判断为盆地相。

深水陆棚相:围绕盆地相分布,见于南京市鼓楼区、六合区冶山、无锡市DS1井、盱眙县GuanD1井幕府山组剖面,一般为多种岩性组合,底部常见黑色碳质页岩、硅质岩、硅质页岩、夹白云岩、泥质云岩,上部多变为灰色巨厚层灰岩,局部地区见少量硅化页岩或灰黄色砂质页岩,见磷结核,质软,污手;在泥质岩中可见许氏虫、小原油栉虫、圆货贝;在深灰色泥质粉晶云岩中水平层理极发育,未见纹层起伏,而该特征有别于潮坪背景形成的起伏的白云岩。综合认为属深水陆棚沉积。

滨岸—三角洲相:发育于研究区南部边缘,可见于杭州市桐庐县横严线露头,见灰白色中—厚层状石英细砂岩、砂砾岩,根据层厚和砂岩成分成熟度推测为滨岸相或者三角洲沉积。

3.2 早寒武世烃源岩发育特征

幕府山组是下寒武统主力烃源岩,主要为暗色泥页岩,野外露头普遍见黑色页岩、含碳质泥岩,在滁州全椒等局部地区出露硅质泥岩。

本次研究以钻取岩心的 GuanD1, SD121, W2 井分析数据为基础,评价幕府山组烃源岩,同时收集前人露头分析数据并进行对比分析(表1)。对 GuanD1 井岩心样品进行有机碳、热解生烃潜量、氯仿沥青“A”抽提及族组分等测定(图4)。GuanD1 井幕府山组厚度 442.40 m,烃源岩段为黑色碳质泥岩和石煤(富含藻类等有机质的泥岩在高成熟阶段形成),总有机碳含量为 0.51%~47.7%,均值 9.82%,以此判断该套烃源岩为好的烃源岩。热解生烃潜量(S_1+S_2)为 0.02~1.24 mg/g,整体上很低,均值 0.29 mg/g;同时指示有机质丰度的另一指标氯仿沥青“A”含量也很低,总体上都小于0.05%,分析原因为烃源岩热演化程度很高,进入了过成熟

阶段。SD121 井幕府山组烃源岩有机碳含量为 0.55%~4.84%,均值 3%,达到很好级别的烃源岩,厚度有 120 m。W2 井幕府山组烃源岩有机碳含量为 0.57%~10%,有 80%的样品达到很好的烃源岩标准。综合分析,幕府山组烃源岩达好的烃源岩标准。

对苏北地区 7 口钻遇幕府山组泥页岩的探井及苏南地区幕府山组野外露头泥页岩样品分析^[46]表明,幕府山组黑色泥页岩有机质十分富集,有机碳含量为 0.66%~12.1%,均值 3.32%,有机碳质量分数大于 1%的样品比例达 92%,属好—很好的烃源岩,这一结论与本次评价结果相似,其差值应为风化等原因引起。

3.3 早寒武世烃源岩品质与沉积相带关系

下扬子陆域盱眙地区 GuanD1 井幕府山组烃源岩发育段分析表明,烃源岩有机质丰度高、暗色泥岩集中发育的 380~485 m 井段属盆地相(图3);在另外 2 口井中显示南部及北部拗陷深水陆棚相—盆地相烃源岩有机质丰度较高,大部分超过 4%,并且厚度相对也较大,如南部宣城地区盆地相 W2 井下寒武统总有机碳含量超过 0.5%的烃源岩厚度达 465 m,北部盱眙 GuanD1 井则达 442 m;而中部浅水陆棚相烃源岩的有机质丰度指标相对略低,但大部分总有机碳含量也超过 2.5%,主要表现为源岩厚度变小。因此,下扬子区幕府山组烃源岩发育受控于岩相古地理环境,品质好、厚度大的烃源岩主要集中在盆地相及深水陆棚相,其次是浅水陆棚相,该相带内烃源岩有机质丰度降低、厚度减小。

幕府山组的高有机质丰度烃源岩与深水陆棚相、盆地相关系密切。在平面上,早寒武世的沉积相带既受下扬子地区在晚震旦世形成“一隆两拗”沉积格局的影响,又受影响广泛的海侵影响,形成广泛的细粒沉积,在研究区东北部和中南部为拗陷区,发育盆地相及深水陆棚相,灰黑色泥岩、碳质泥岩、薄层泥质灰岩和硅质岩发育,是厚层、高丰度烃源岩发育区;北部边缘及南部边缘为浅水陆棚相,厚层白云岩、灰质白云岩发育,暗色泥岩不发育或较薄,烃源岩有机质丰度也降低。高品质烃源岩以南、北两个盆地相为中心,在盆地相及深水陆棚相带内比较发育,在浅水陆棚相带内厚度减薄。

3.4 早寒武世烃源岩发育有利区

在研究区中南部为盆地相和深水陆棚相发育区(图3),该区域内在陆区有大量井钻遇了较厚的幕府山组暗色页岩,是烃源岩的有利发育区。而在

表 1 下扬子—南黄海下寒武统幕府山组烃源岩厚度
Table 1 Source rock thickness of Lower Cambrian Mufushan Formation, Lower Yangtze and South Yellow Sea

样品点	烃源岩厚度/m	暗色泥岩厚度/m
盱眙 GuanD1	93	442
泰州 SD121	120	368
宣城 W2		465
淮安 NC1		46
南京幕府山露头	50~300	
Q087		78
D002		111

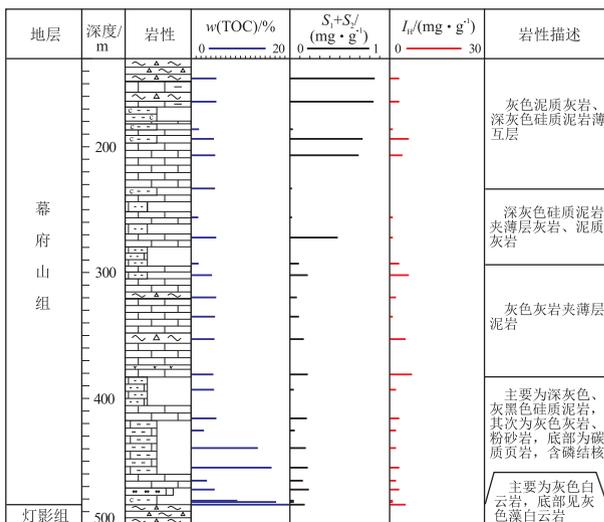


图 4 江苏盱眙 GuanD1 井下寒武统幕府山组烃源岩地化综合柱状图

Fig.4 Geochemical column of source rocks in Lower Cambrian Mufushan Formation in well GuanD1, Xuuyi, Jiangsu province

研究区的东北部,在早寒武世发育一个近北东向的深水陆棚相区域,该区主要覆盖了现今陆区的江苏地区和南黄海盆地的中部隆起及北部拗陷,预测在该区域内幕府山组烃源岩厚度超过 50 m;而在研究区的东北部边缘及东南部边缘,主要发育浅水陆棚相沉积,预测该区域内烃源岩厚度逐渐减薄。

4 晚奥陶世—早志留世古地理环境与烃源岩发育

4.1 晚奥陶世—早志留世沉积古地理

晚奥陶世五峰期,研究区仍处于南北拉张背景下,该时期海平面上升,海域范围增大,浅水相沉积分布面积减少,主要属于陆棚—台地相,研究区内沉积相呈 NE—SW 向条带展布,深水沉积向东北方向延展,深海沉积相面积变大。在下扬子陆区西南部有盆地相出露,岩性主要为黑色页岩夹硅质页岩,五峰组黑色硅质、碳质页岩中硅质含量较高,富含笔石,局部见腕足类。由于海平面上升,陆棚相沉积向早期的台地相方向扩张,原有的台地相、台内滩相被深水陆棚相替代,而五峰期浅水沉积主要表现为孤立台地相、浅水陆棚相,浅水陆棚相岩性主要为灰黑色硅质页岩及硅质岩、灰质泥岩、粉砂质泥页岩;在下扬子陆区的中部及西北缘,在陆棚相带中发育几个独立台地,岩性主要为泥灰岩、云质灰岩、灰岩,含黄铁矿瘤状云质灰岩。

早志留世高家边期,下扬子陆区及南黄海地区已处于弱挤压背景下,受自南向北的挤压影响,该时期深水区域开始向北迁移,南侧已抬升为浅水区,自南向北水深逐渐增加。在研究区西北部南京及芜湖地区为盆地相,围绕深水区发育斜坡相,浅水及滨岸相沉积出露于下扬子区东南部,有陆棚相及潮坪相、滨岸三角洲相(图 5)。

盆地相:在下扬子陆区西南缘发育,见于无为县沿山剖面、SK1 井、GuD1 井、含山县仑山陈夏村剖面、南京市江宁区汤头村及五峰村、青龙山剖面。底部往往为一套厚层黑色泥岩、泥页岩夹少量紫色页岩及薄层灰色粉砂岩;下部灰黑色页岩发育;中部灰黑色页岩夹黄灰色薄层石英细砂岩;上部为灰黄、浅灰紫色页岩间夹灰黄色长石石英细砂岩。向上砂质含量逐渐增加但以页岩沉积为主,反映水体向上变浅环境。高家边组底部及中下部发育黑色页岩,反映深水盆地相沉积,向上变为灰绿色、黄绿色,反映水体变浅;页岩里富含笔石,整体为大套页岩而无厚层砂岩发育,反映远离浊积扇的盆地相沉积环境。

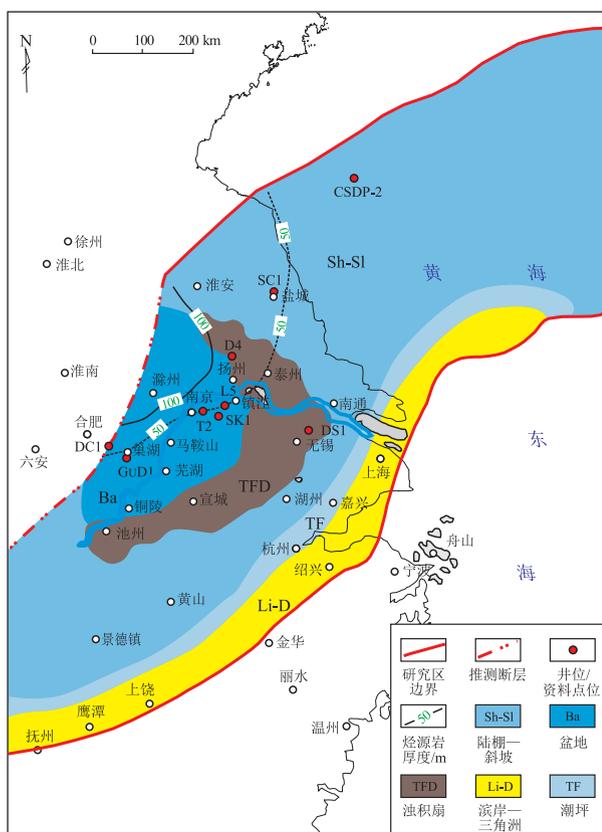


图 5 下扬子—南黄海上奥陶统五峰组—下志留统高家边组岩相及烃源岩分布

Fig.5 Lithofacies and source rock distribution of Upper Ordovician Wufeng–Lower Silurian Gaojiabian formations, Lower Yangtze and South Yellow Sea

斜坡相:围绕盆地相南缘及东缘分布,见于铜陵市郊区剖面、无锡市 DS1 井。其岩性为页岩、粉砂质页岩,可见明显软变形结构,反映一定坡度的重力滑塌沉积。在该相带内高家边组下部为深灰色、灰黑色泥岩夹泥质岩屑石英细砂、泥质粉砂岩,向上变为灰、深灰色泥岩及粉砂质泥岩夹灰绿色含泥长石石英细砂岩。在该组地层中见鲍马序列 A 段、撕裂屑、火焰构造和滑塌液化现象,反映浊积扇近端斜坡沉积,其沉积环境为斜坡相。

陆棚相:围绕盆地相及斜坡相发育,见于宁国县新岭秦坑口、安吉县峇糠岭和黄野、广德县塘辛剖面、宁国市胡西路、池州市贵池区等剖面及南黄海盆地中部隆起 CSDP-2 井。在该相带内高家边组(霞乡组)底部在局部地区可见黄色中厚层中细粒长石质砂岩,厚约 0~5 m;下部为深灰色厚层块状砂岩夹黑色页岩,厚约 91 m;中部为灰绿、暗绿色厚—巨厚层细砂岩夹黄绿色粉砂质页岩等,厚约 247 m;上部为灰绿色页岩及黄色砂质页岩,厚约 435 m。陆棚相高家边组(霞乡组)总厚约 778~1 202 m,自东向西厚度增大。与晚奥陶世沉积相

比,本组主体为砂质页岩或砂岩夹页岩,砂岩明显增多,中上部以粉砂岩和砂岩为主,局部发育黄绿色中—厚层细砂岩、泥质粉砂岩、灰绿色粉砂岩,含扬子珊笔石、角石、原始锯笔石;中—厚层砂岩具有向上增厚结构,反映深水陆棚沉积序列,CSDP-2井高家边组顶部出现白云岩,反映浅水强蒸发环境,局部发育页岩又反映深水陆棚沉积环境,综合各种因素认为该相带为陆棚相。

滨岸相(潮坪相):主要分布于研究区东南边缘,见于德清县三桥西门山、杭州市富阳区半坞剖面。剖面底界含砾砂岩具波痕,其砾径和含量较大,且在含砾砂岩的灰色粉砂质页岩夹层中采得瓣鳃类(*Cleidophorus*)及少量笔石。波痕反映浪击面以上沉积环境,而在粉砂质页岩中的瓣鳃类也反映浅水沉积,综合认为该区处于潮坪沉积环境^[47]。

综合分析五峰组—高家边组时期的沉积格局,该时期反映深水沉积的盆地相为研究区西南部,斜坡相、陆棚相及反映浅水沉积的滨岸相(潮坪相)依次呈近似条带状,为东南方向,这是前陆盆地沉积相带展布的最典型特征。同时,五峰组—高家边组底部反映深水沉积的盆地相并非典型的条带状发育,而是近环带状发育,这反映在高家边组沉积早期仍然继承了五峰组沉积时期拉张背景下的克拉通边缘盆地中盆地相呈环带状发育的沉积格局。

4.2 晚奥陶世—早志留世烃源岩发育特征

五峰组—高家边组烃源岩分析数据主要源于南黄海的CSDP-2井和陆区的DC1等井的岩心样品测试结果,结合收集的其他陆区资料,对该层段烃源岩特征进行综合分析。

DC1井五峰组—高家边组底部发育暗色泥岩、页岩,其中高家边组底部泥岩总有机碳含量为0.69%~5.46%,平均值为2.5%,为一套好—很好的烃源岩(图6);向上总有机碳含量逐渐降低,到该组中上段为非烃源岩。下扬子陆区N4井资料揭示高家边组有机质丰度为0.54%~2.67%。南京汤山和句容钻遇高家边组的浅井以及江苏省页岩气公司部署的苏页1井见黑色泥页岩,富含笔石,其五峰组—高家边组黑色笔石页岩有机质丰度较高,总有机碳含量为1.2%~4.0%。总体上这几口井中均钻遇较好品质的五峰组—高家边组烃源岩。

另外一些井钻遇高家边组的总有机碳含量为低值,如D4井,岩性主要由泥岩、粉砂质泥岩、泥岩与粉砂岩互层等组成,该井烃源岩总有机碳含量高值区为志留系底部—奥陶系顶部,分布范围为0.01%~3.29%,均值为1.28%,有机质丰度总体上

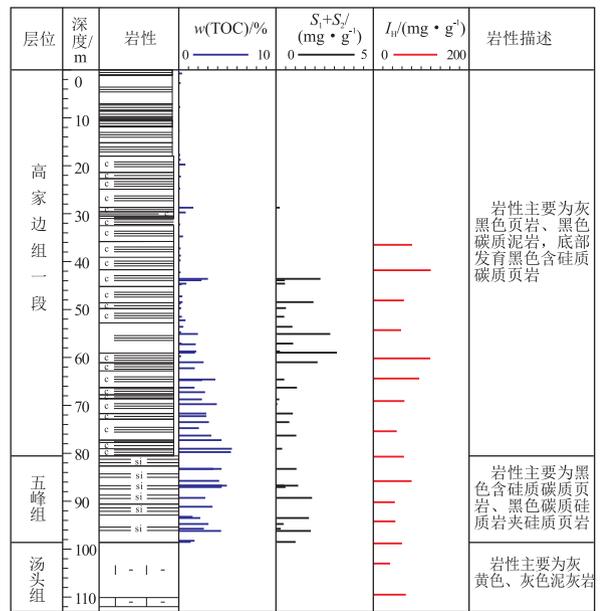


图6 安徽巢湖地区DC1井上奥陶统五峰组—下志留统高家边组烃源岩综合柱状图

Fig.6 Geochemical column of source rocks in Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Gaojiabian formations in well DC1, Chaohu, Anhui province

偏低。南黄海中部隆起CSDP-2井钻遇高家边组上段,未钻穿;岩性以灰色、灰黑色泥岩为主,其泥岩有机碳含量为0.21%~0.47%,均值0.26%,未达到有效烃源岩的下限标准,也可能是由于该井仅钻遇到志留系上段的浅灰黑色的泥岩段,尚未钻达高家边组底部富含笔石段的主力烃源岩层。综合前述,五峰组—高家边组烃源岩在部分区域为品质好的烃源岩,部分区域为差烃源岩或非烃源岩。

4.3 晚奥陶世—早志留世烃源岩展布与沉积相带

晚奥陶世—早志留世好烃源岩在盆地相及深水陆棚相带内发育。五峰组和高家边组沉积时期,深水区主要为陆域南京—盱眙一带,发育了一套盆地相—陆棚相沉积地层,为一套灰、黑色笔石页岩、硅质岩,在DC1井等井揭示。该区域内的五峰组和高家边组下段是下扬子区重要的烃源岩层,其总有机碳含量为2.3%~2.5%(图6)。在下扬子区的东南部,围绕盆地相主要发育斜坡相、浅水陆棚相或滨岸相沉积,暗色泥岩发育很薄或不发育,主要发育砂质泥岩或泥质砂岩,其有机碳含量总体上低于0.5%,达不到烃源岩标准。在研究区东北部,围绕盆地相发育陆棚相,该相带内烃源岩有机碳含量随远离盆地而逐渐降低,如D4井均值为1.28%。而到了南黄海的CSDP-2井,目前见到泥岩有机碳含量均值为0.26%,最高值为0.47%。综合分析认为,盆地相及东北部陆棚相控制了晚奥陶世—早志

面、巢湖市平顶山凤凰山二叠系剖面。岩性主要为灰黑色、黑色薄层钙质泥岩与灰色粉砂岩互层,局部发育灰黑色厚层生物灰岩。地层中含大量植物化石碎片、蠕类、生物碎屑,见燧石条带。植物炭屑和植物化石指示浅水沉积,大套含生物灰岩指示浅水碳酸盐岩沉积,同时砂质的混入反映陆源物质影响,综合认为属滨岸相沉积。

总体来看,龙潭组沉积时期整体呈环带状的古地理格局,中心部位为陆棚环境,向周缘变为三角洲及滨岸环境,总体上反映了坳陷型盆地的沉积格局。

5.2 龙潭组烃源岩发育特征

在下扬子—南黄海区域有大量露头及多口钻井揭示龙潭组烃源岩,由暗色泥岩和碳质泥岩组成。南黄海 CSDP-2 井龙潭组暗色泥岩有机碳含量为 0.51%~2.44%, 均值 1.0%; 碳质泥岩有机碳含量为 6.58%~24.9%, 均值 12.7%; S_1+S_2 分布于 0.01~2.14 mg/g, 均值 0.42 mg/g; 沥青“ A ”含量均小于 0.05%; 热解氢指数为 1.13~92.81 mg/g (图 8),

指示中等—好的烃源岩。南黄海 CZ35 井龙潭组暗色泥岩有机碳含量为 0.75%~5.43%, 均值 1.67%; S_1+S_2 为 0.89~7.79 mg/g, 均值 3.1 mg/g; 沥青“ A ”含量为 0.09~0.76%, 均值 0.29%; 热解氢指数为 70.53~411.18 mg/g, 均值 148.25 mg/g, 综合评价为好的烃源岩 (图 9)。另外, 陆区 HC1 井龙潭组暗色泥岩有机碳含量为 0.86%~3.76%, 均值 1.90%; 碳质泥岩有机碳含量为 7.66%~16%; S_1+S_2 为 0.58~1.48 mg/g; 热解氢指数为 6.05~118 mg/g, 指示好的烃源岩。综合分析认为龙潭组属于中等—好烃源岩。

5.3 龙潭组烃源岩展布与沉积相带关系

下扬子—南黄海地区龙潭组烃源岩主要为暗色泥岩及碳质泥岩,是一套以陆相物源形成的沉积体,因此,该套烃源岩形成的环境要求既要距滨岸带有一定距离,以形成安静的水体有利于有机质保存,同时也不能距陆源物质输入太远而不利于植物生长。根据对各相带泥岩有机碳含量的统计,龙潭组最有利于烃源岩发育的相带是潮坪相、三角洲相,这些相带内适合发育煤系地层,如 CZ35、WX5、CSDP-2 等井龙潭组三角洲相泥岩有机碳丰度高,尤其是局部碳质泥岩和煤层有机碳含量达 16%, 均值达 3.59%; 同时该相带烃源岩厚度大,一般在

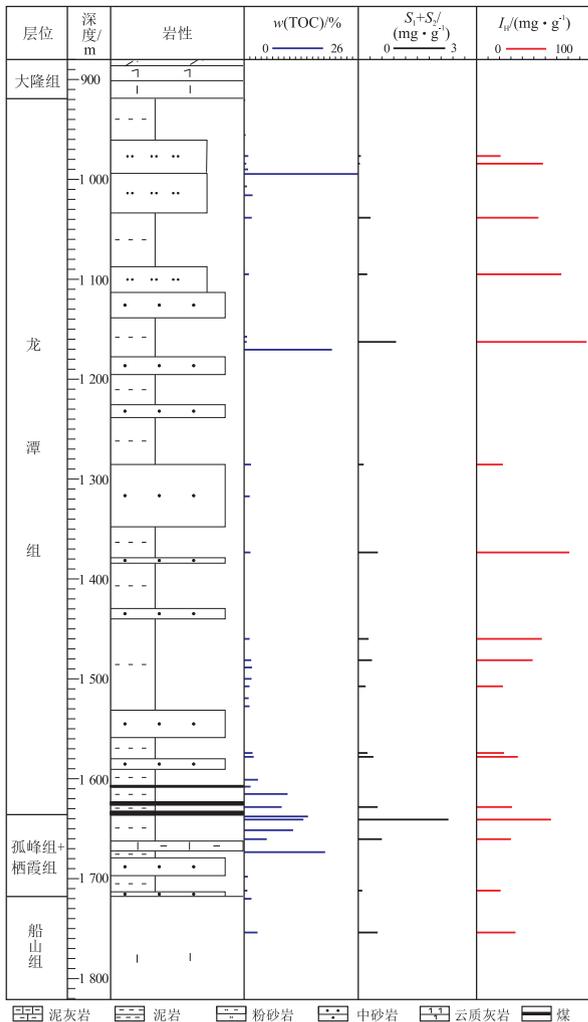


图 8 南黄海地区 CSDP-2 井地化综合柱状图

Fig.8 Geochemical column of well CSDP-2, South Yellow Sea

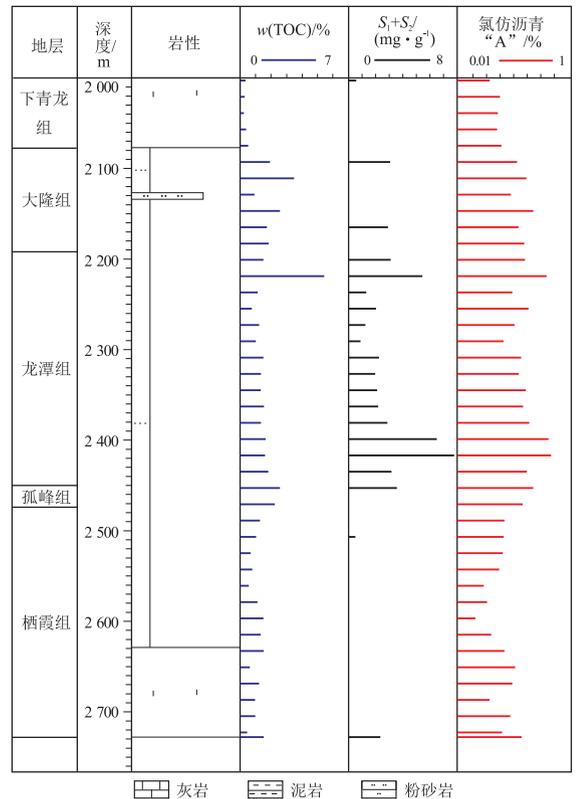


图 9 南黄海地区 CZ35 井地化综合柱状图

Fig.9 Geochemical column of well CZ35, South Yellow Sea

100~300 m(图 7)。而陆棚相和沼泽相龙潭组虽然发育暗色泥岩,但总体有机质丰度稍低,源岩厚度不如三角洲相。滨岸相龙潭组源岩发育程度比沼泽相稍差,烃源岩有机碳含量进一步降低。

综合分析认为龙潭组主要是在三角洲相、陆棚相、潮坪相、沼泽相环境下形成的烃源岩,其分布受控于这 4 个相带的展布。龙潭期沉积相带的平面展布又受控于该时期的大地构造环境和盆地原型,即晚二叠世扬子板块向北移动已开始与华北板块碰撞,形成活动大陆边缘坳陷型盆地,在该盆地内,三角洲相、陆棚相、潮坪相、沼泽相呈环带状,在这些相带内发育了较好的龙潭组烃源岩。

5.4 龙潭组烃源岩有利发育区

根据龙潭组烃源岩与岩相之间的对应关系,从研究区的西南部到东部,即从陆区的安徽东南部到江苏东南部、海区的南黄海盆地南部,发育三角洲相、陆棚相、潮坪相、沼泽相,龙潭组烃源岩发育良好。而在研究区的西北部及东南部,即江苏东北部及浙江东南部,主要发育边缘粗粒沉积相带,龙潭组烃源岩发育较差或不发育烃源岩(图 7)。

6 结论与讨论

6.1 结论

(1)盆地发育时期的动力学环境决定了该时期的盆地原型,盆地原型影响盆内岩相展布格局,烃源岩发育与特定沉积相带关系密切,因此,研究某一时期的盆地发育构造环境及盆地原型,有利于预测烃源岩平面展布。

(2)幕府山组沉积时期,下扬子—南黄海地区属于拉张动力学背景下的被动大陆边缘克拉通盆地,在该盆地中,盆地相及深水陆棚相为烃源岩发育的优势相带,发育幕府山组优质烃源岩;盆地相及深水陆棚相呈环带状围绕古隆起或台地发育;在下扬子陆区,幕府山组的盆地相及深水陆棚相也具有这一特征,在早寒武世发育一个近北东向的盆地相及深水陆棚相区域,该区主要覆盖了现今陆区的江苏地区和南黄海盆地的中部隆起及北部坳陷,预测在该区域内幕府山组烃源岩品质好、厚度较大;而在研究区的东北部边缘及东南部边缘,主要发育浅水陆棚相沉积,预测该区域内烃源岩厚度逐渐减薄。

(3)五峰组—高家边组沉积时期,下扬子—南黄海地区处于挤压动力学背景下的前陆盆地,在该盆地中盆地相、斜坡相、深水陆棚相、浅水陆棚相由西北向东南依次呈条带状分布;盆地相、深水陆棚

相为五峰组—高家边组烃源岩发育的优势相带;根据前陆盆地的相带展布规律,盆地相、深水陆棚相沉积在下扬子陆区北缘发育,主要覆盖了陆区的浙江西部、安徽中东部和江苏东北部,在该区域内五峰组—高家边组烃源岩发育较好。而在南黄海盆地中北部,也可能发育陆棚相较深水沉积,从而发育一定厚度的烃源岩,但厚度可能不大。在研究区的东南部,包括南黄海盆地南部、浙江东南部、安徽南部地区主要发育浅水陆棚相及滨岸相沉积,烃源岩发育较差或不发育。

(4)龙潭组沉积时期,下扬子—南黄海地区处于挤压背景下发育的活动大陆边缘坳陷型盆地。在该盆地中各沉积相带呈环带状分布,在环带中心部位为陆棚环境,向周缘变为三角洲、潮坪、滨岸环境。三角洲相及潮坪相为烃源岩发育的优势相带,发育了龙潭组品质中等—好的烃源岩;其次陆棚环境虽然发育较厚的龙潭组烃源岩,但品质上不如三角洲相及潮坪相、沼泽相。根据活动大陆边缘坳陷型盆地的相带展布规律,从陆区的安徽东南部到江苏东南部、海区的南黄海盆地南部,发育三角洲相、陆棚相、潮坪相、沼泽相,龙潭组烃源岩发育良好。而在研究区的西北部及东南部,即江苏东北部及浙江东南部,主要发育边缘粗粒沉积相带,龙潭组烃源岩发育较差或不发育。

6.2 讨论

(1)下扬子区二叠系盆地性质一直存在争议,部分研究认为该时期为被动大陆边缘盆地^[28,48],另一部分专家通过对巢湖地区碎屑锆石物源、火山岩夹层微量元素及区域岩相古地理变化分析认为,距今 270 Ma 左右已经存在古太平洋板块的俯冲,据此认为下扬子区自中二叠世开始为弧后前陆盆地^[49]。之所以出现上述差异巨大的观点,其根本原因在于华南与华北板块在下扬子区的拼合极其复杂。首先,从拼合时间上看,两个板块在下扬子地区发生碰撞的时间与中扬子地区不同,甚至在下扬子地区也存在分段碰撞的可能;第二,在南黄海地区,不论是在物源还是在岩相古地理方面,早二叠世与晚二叠世均存在巨大差异,说明南黄海地区二叠纪早期与晚期可能分属于不同盆地类型;第三,下扬子区拼合方式与经典陆陆碰撞方式存在明显差异,该区华南板块是“骑”在古太平洋板块上与华北板块相碰撞^[32],不能用判断经典陆陆碰撞的证据来分析下扬子区的陆陆碰撞方式、时间及效应。

(2)对于高成熟度条件下有机碳含量恢复已有大量研究^[50-51],即有机质在进入成熟阶段后,随

着生烃及裂解,烃源岩中的有机碳含量会逐渐下降,现今测得岩石中实为残余有机碳含量,并建立了4类恢复方法,即自然演化剖面、热模拟实验、谱学类型模型和理论计算(包含元素模型、热降解和物质平衡)。利用热降解法对准噶尔盆地及中上扬子五峰组页岩有机碳含量进行了恢复,准噶尔盆地石炭系烃源岩 R_o 介于0.95%~2.0%,I型,II型,III型有机质恢复系数平均分别为2.45,1.42,1.04^[52]。对中上扬子地区重庆城口、南江、湖北龙山及来凤剖面五峰组页岩的研究表明,该区五峰组页岩 R_o 介于0.9%~2.9%,均值1.7%,由于五峰组页岩有机质类型为I型,根据热降解法计算其有机质恢复系数2.10~2.46,均值2.40^[51]。在有机质进入成熟、高成熟阶段后,其恢复系数与有机质类型的关联度更大。

(3)本次研究3套烃源岩的有机质丰度数据均为实测数据,未行校正。幕府山组烃源岩有机质类型主要为I型,少量为II₁型,其热演化程度普遍较高,处于高成熟—过成熟演化阶段。大部分泥岩的等效镜质体反射率为0.73%~3.01%,平均为2.83%。少部分较高,如GuanD1井幕府山组镜质体反射率介于3.43%~4.21%。五峰组—高家边组有机质类型主要为I型,少量II₁型和II₂型,其有机质成熟度也很高, R_o 分布在1.1%~2.6%。如GuD1井 R_o 为1.65%~2.11%,处于高成熟—过成熟阶段。DC1井志留系烃源岩 R_o 为1.19%~1.39%,进入成熟—高熟阶段。龙潭组有机质类型主要为III型, R_o 为1.5%~2.3%,平均2.2%,进入高成熟—过成熟演化阶段。因此,3套烃源岩均已进入成熟—高成熟阶段,从有机质丰度对比来看,需要进行恢复;而从烃源岩类型来看,幕府山组、五峰组—高家边组有机质类型主要为I型,其恢复系数可能在2.0以上,而龙潭组有机质类型主要为III型,其恢复系数可能在1.0~1.5之间。

参考文献:

- [1] 张敏强,高顺莉,谭思哲.南黄海盆地中、古生界地质特征及勘探方向[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(3):24-34. ZHANG Minqiang,GAO Shunli,TAN Sizhe.Geological characteristics of the Meso-Paleozoic in South Yellow Sea Basin and future exploration[J].Marine Geology & Quaternary Geology,2018,38(3):24-34.
- [2] 陈建文,雷宝华,梁杰,等.南黄海盆地油气资源调查新进展[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(3):1-23. CHEN Jianwen,LEI Baohua,LIANG Jie,et al.New progress of petroleum resources survey in South Yellow Sea Basin[J].Marine Geology & Quaternary Geology,2018,38(3):1-23.
- [3] 郭兴伟,张训华,吴志强,等.大陆架科学钻探 CSDP-2 井科学目标及初步成果[J].吉林大学学报(地球科学版),2019,49(1):1-12. GUO Xingwei,ZHANG Xunhua,WU Zhiqiang,et al.Scientific objectives and preliminary progresses of CSDP-2 well in continental shelf drilling program[J].Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2019,49(1):1-12.
- [4] 蔡来星,王蛟,郭兴伟,等.南黄海中部隆起中—古生界沉积相及烃源岩特征:以 CSDP-2 井为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2017,47(4):1030-1046. CAI Laixing,WANG Jiao,GUO Xingwei,et al.Characteristics of sedimentary facies and source rocks of Mesozoic-Paleozoic in central uplift of South Yellow Sea: a case study of CSDP-2 coring well[J].Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2017,47(4):1030-1046.
- [5] 陈春峰,施剑,徐东浩,等.南黄海崂山隆起形成演化及对油气成藏的影响[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(3):55-65. CHEN Chunfeng,SHI Jian,XU Donghao,et al.Formation and tectonic evolution of Laoshan Uplift of South Yellow Sea Basin and its effect on hydrocarbon accumulation[J].Marine Geology & Quaternary Geology,2018,38(3):55-65.
- [6] 谭思哲,陈春峰,徐振中,等.南黄海古生界烃源特征及资源潜力评估[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(3):116-124. TAN Sizhe,CHEN Chunfeng,XU Zhenzhong,et al.Geochemical characteristics and hydrocarbon generation potentials of Paleozoic source rocks in the Southern Yellow Sea Basin[J].Marine Geology & Quaternary Geology,2018,38(3):116-124.
- [7] 林小云,刘建,陈志良,等.中下扬子区海相烃源岩分布与生烃潜力评价[J].石油天然气学报,2007,29(3):15-19. LIN Xiaoyun,LIU Jian,CHEN Zhiliang,et al.Marine source rock distribution and hydrocarbon generation potential in Middle and Lower Yangtze region[J].Journal of Oil and Gas Technology,2007,29(3):15-19.
- [8] 张银国,陈清华,陈建文,等.下扬子海相中—古生界烃源岩发育的控制因素[J].海洋地质前沿,2016,32(1):8-12. ZHANG Yinguo,CHEN Qinghua,CHEN Jianwen,et al.Controlling factors on the Mesozoic-Paleozoic marine source rocks in the Lower Yangtze Platform[J].Marine Geology Frontiers,2016,32(1):8-12.
- [9] 文玲,胡书毅,田海芹.扬子地区志留纪岩相古地理与石油地质条件研究[J].石油勘探与开发,2002,29(6):11-14. WEN Ling,HU Shuyi,TIAN Haiqin.Lithofacies paleogeography and petroleum geology of the Silurian in Yangtze area[J].Petroleum Exploration and Development,2002,29(6):11-14.
- [10] 周小进.中国南方二叠纪构造—层序岩相古地理[D].长沙:中南大学,2009. ZHOU Xiaojin.Tectonic—sequence-based lithofacies and paleogeography of Permian in South of China[D].Changsha:Central South University,2009.
- [11] 路琳琳,纪友亮.下扬子地区寒武纪层序格架及古地理演化[J].古地理学报,2013,15(6):765-776. LU Linlin,JI Youliang.Sequence stratigraphic framework and palaeogeography evolution of the Cambrian in Lower Yangtze

- area[J].*Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(6): 765-776.
- [12] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. 地质前缘, 2005, 12(3): 39-48.
ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, BIAN Lizeng, et al. Development constraints of marine source rocks in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 39-48.
- [13] 梁狄刚, 郭彤楼, 边立曾, 等. 中国南海相生烃成藏研究的若干新进展(三) 南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J]. 海相油气地质, 2009, 14(2): 1-19.
LIANG Digang, GUO Tonglou, BIAN Lizeng, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, Southern China (part 3): controlling factors on the sedimentary facies and development of Palaeozoic marine source rocks[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(2): 1-19.
- [14] 邓运华. 试论海湾对海相石油的控制作用[J]. 石油学报, 2018, 39(1): 1-11.
DENG Yunhua. Discussion on the control effect of gulf on marine petroleum[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(1): 1-11.
- [15] 朱伟林, 杨甲明, 杜栩, 等. 国外含油气盆地丛书: 欧洲含油气盆地[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
ZHU Weilin, YANG Jiaming, DU Xu, et al. Overseas hydrocarbon basin series: European hydrocarbon basins [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [16] 朱伟林, 陈书平, 王春修, 等. 国外含油气盆地丛书: 非洲含油气盆地[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
ZHU Weilin, CHEN Shuping, WANG Chunxiu, et al. Overseas hydrocarbon basin series: African hydrocarbon basins [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [17] 朱伟林, 吴景富, 张功成, 等. 中国近海新生代盆地构造差异性演化及油气勘探方向[J]. 地质前缘, 2015, 22(1): 88-101.
ZHU Weilin, WU Jingfu, ZHANG Gongcheng, et al. Discrepancy tectonic evolution and petroleum exploration in China offshore Cenozoic basins[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 88-101.
- [18] 朱伟林, 崔早云, 吴培康, 等. 被动大陆边缘盆地油气勘探新进展与展望[J]. 石油学报, 2017, 38(10): 1099-1109.
ZHU Weilin, CUI Hanyun, WU Peikang, et al. New development and outlook for oil and gas exploration in passive continental margin basins[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(10): 1099-1109.
- [19] 张功成, 屈红军, 张凤廉, 等. 全球深水油气重大新发现及启示[J]. 石油学报, 2019, 40(1): 1-34.
ZHANG Gongcheng, QU Hongjun, ZHANG Fenglian, et al. Major new discoveries of oil and gas in global deepwaters and enlightenment[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(1): 1-34.
- [20] 张渝昌, 秦德余, 蒋洪堪, 等. 中国含油气盆地原型分析[M]. 南京: 南京大学出版社, 1997.
ZHANG Yuchang, QIN Deyu, JIANG Hongkan, et al. Prototype hydrocarbon basin analysis of China[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1997.
- [21] 周小进, 杨帆. 中国南方新元古代—早古生代构造演化与盆地原型分析[J]. 石油实验地质, 2007, 29(5): 446-451.
ZHOU Xiaojin, YANG Fan. Tectonic evolution and prototypes analysis from Neoproterozoic to Early Paleozoic in South China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(5): 446-451.
- [22] 曹清古, 刘光祥, 张长江, 等. 四川盆地晚二叠世龙潭期沉积环境及其源控作用分析[J]. 石油实验地质, 2013, 35(1): 36-41.
CAO Qinggu, LIU Guangxiang, ZHANG Changjiang, et al. Sedimentary environment and its controlling on source rocks during Late Permian in Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(1): 36-41.
- [23] 朱夏. 关于盆地研究的几点意见[J]. 石油实验地质, 1980, 2(3): 19-24.
ZHU Xia. Comments on basin research[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1980, 2(3): 19-24.
- [24] 周祖翼, 丁晓, 廖宗廷, 等. 边缘海盆地的形成机制及其对中国东南地质研究的启示[J]. 地球科学进展, 1997, 12(1): 7-14.
ZHOU Zuyi, DING Xiao, LIAO Zongting, et al. Formation of marginal basins and its implication to the tectonic evolution of Southeast China[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1997, 12(1): 7-14.
- [25] 郭彤楼. 下扬子地区中生界叠加改造特征与多源多期成藏[J]. 石油实验地质, 2004, 26(4): 319-323.
GUO Tonglou. Superimposition and modification of the Mesozoic and Paleozoic basins and multi-stages of hydrocarbon accumulation with multiple source rocks in Lower Yangtze area[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2004, 26(4): 319-323.
- [26] 郝杰, 翟明国. 罗迪尼亚超大陆与晋宁运动和震旦系[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 139-152.
HAO Jie, ZHAI Mingguo. Jinning movement and Simian system in China; their relationship with Rodinia Supercontinent [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2004, 39(1): 139-152.
- [27] 刘海军. 下扬子区中生代区域构造演化及其对盆地发育的控制[D]. 上海: 同济大学, 2009.
LIU Haijun. Regional tectonic evolution of Paleozoic to Mesozoic in Lower Yangtze region and its control on basin development [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [28] ZHAO Guochun, WANG Yuejun, HUANG Baochun, et al. Geological reconstructions of the East Asian blocks: from the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 262-286.
- [29] YAO Weihua, LI Zhengxiang, LI Wuxian, et al. Detrital provenance evolution of the Ediacaran-Silurian Nanhua Foreland Basin, South China [J]. *Gondwana Research*, 2015, 28(4): 1449-1465.
- [30] 冯志强, 陈春峰, 姚永坚, 等. 南黄湖北部前陆盆地的构造演化与油气突破[J]. 地质前缘, 2008, 15(6): 219-231.
FENG Zhiqiang, CHEN Chunfeng, TAO Yongjian, et al. Tectonic evolution and exploration target of the northern foreland basin of the South Yellow Sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(6): 219-231.
- [31] YIN An, NIE Shangyou. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia [J]. *Tectonics*, 1993, 12(4): 801-813.
- [32] LI Sanzhong, JAHN B M, ZHAO Shujuan, et al. Triassic south-eastward subduction of North China Block to South China Block: insights from new geological, geophysical and geochemical data [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 166: 270-285.
- [33] 王孝磊, 周金城, 陈昕, 等. 江南造山带的形成与演化[J]. 矿

- 物岩石地球化学通报,2017,36(5):714-735.
- WANG Xiaolei, ZHOU Jincheng, CHEN Xin, et al. Formation and evolution of the Jiangnan Orogen [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(5): 714-735.
- [34] YAO Jinlong, CAWOOD P A, SHU Liangshu, et al. Jiangnan Orogen, South China; a ~970-820 Ma Rodinia margin accretionary belt [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 196: 102872.
- [35] YAO Weihua, LI Zhengxiang. Tectonostratigraphic history of the Ediacaran-Silurian Nanhua Foreland Basin in South China [J]. Tectonophysics, 2016, 674: 31-51.
- [36] 郑和荣, 胡宗全. 中国前中生代构造—岩相古地理图集 [M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- ZHENG Herong, HU Zongquan. Atlas of tectonic-lithofacies paleogeography of Pre-Mesozoic in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [37] 杨树锋, 陈汉林, 龚根辉, 等. 下扬子地区早古生代晚期前陆盆地沉积特征与盆山过程 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2019, 44(5): 1494-1510.
- YANG Shufeng, CHEN Hanlin, GONG Genhui, et al. Sedimentary characteristics and basin-orogen processes of the late Early Paleozoic foreland basins in the Lower Yangtze region [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2019, 44(5): 1494-1510.
- [38] GONG Genhui, CHEN Hanlin, WANG Fang, et al. The ductile deformation characteristics of Caledonian Intracontinental Orogeny in the northeastern Jiangshan-Shaoxing Tectonic Zone; insights from magnetic fabric study and its geodynamic implication [J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2016, 90(1): 75-87.
- [39] 张训华, 肖国林, 吴志强, 等. 南黄海油气勘探若干地质问题认识和探讨 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- ZHANG Xunhua, XIAO Guolin, WU Zhiqiang, et al. Understanding and discussion on some geological problems of South Yellow Sea oil and gas exploration [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [40] 高小惠, 张训华, 郭兴伟. 大陆架科学钻探 CSDP-2 井揭示的南黄海盆地古生代物源区大地构造属性 [C]//中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会论文摘要集. 杭州: 中国矿物岩石地球化学学会, 2019: 564-566.
- GAO Xiaohui, ZHANG Xunhua, GUO Xingwei. The geotectonic attributes of the Paleozoic provenance area in the South Yellow Sea Basin revealed by the CSDP-2 well of the continental shelf scientific drilling [C]//Abstracts of the 17th Annual Conference of the Chinese Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Hangzhou: Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019: 564-566.
- [41] 任纪舜. 印支运动及其在中国大地构造演化中的意义 [J]. 中国地质科学院院报, 1984, 6(2): 31-44.
- REN Jishun. The Indosinian Orogeny and its significance in the tectonic evolution of China [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1984, 9(2): 31-44.
- [42] CHENG Hao, ZHANG Chao, VERVOORT D J, et al. New Lu-Hf geochronology constrains the onset of continental subduction in the Dabie Orogen [J]. Lithos, 2011, 121(1/4): 41-54.
- [43] CHENG Hao, VERVOORT J D. Combined geochemistry and geochronology constrains coupled subduction of oceanic and continental crust in the Huwan shear zone, Central China [J]. American Mineralogist, 2015, 100(1): 181-194.
- [44] 胡修棉, 王建刚, 安慰, 等. 利用沉积记录精确约束印度—亚洲大陆碰撞时间与过程 [J]. 中国科学(地球科学), 2017, 47(3): 261-283.
- HU Xiumian, WANG Jiangang, AN Wei, et al. Constraining the timing of the India-Asia continental collision by the sedimentary record [J]. Scientia Sinica Earth Sciences, 2017, 60(4): 603-625.
- [45] 李超, 吕璇, 胡修棉, 等. 下扬子砂岩物源分析提供东南沿海晚古生代大陆弧新证据 [J]. 科学通报, 2017, 62(25): 2951-2966.
- LI Chao, LÜ Xuan, HU Xiumian, et al. Sandstone memory of a Late Paleozoic continental arc in Southeast China (Lower Yangtze region) [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(25): 2951-2966.
- [46] 刘小平, 潘继平, 刘东鹰, 等. 苏北地区下寒武统幕府山组页岩气勘探前景 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(2): 198-205.
- LIU Xiaoping, PAN Jiping, LIU Dongying, et al. Shale-gas exploration prospect of Lower Cambrian Mufushan Formation in the northern Jiangsu, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2012, 39(2): 198-205.
- [47] 浙江省地质矿产局. 区域地质矿产调查报告, 临安幅 [M]. 杭州: 浙江省地质矿产局, 1967.
- Zhejiang Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology and mineral survey report, Lin'an district [M]. Hangzhou: Zhejiang Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, 1967.
- [48] 加娜提古丽·吾斯曼, 周瑶琪, 姚旭, 等. 安徽省巢湖地区二叠纪栖霞组、孤峰组硅质岩地球化学特征对比及大地构造背景分析 [J]. 现代地质, 2017, 31(4): 734-745.
- JIANATIGULI Wusiman, ZHOU Yaoqi, YAO Xu, et al. Geochemical characteristics comparison and tectonic background analysis of siliceous rocks from Qixia Formation and Gufeng Formation of Permian in Chaohu area, Anhui Province [J]. Geoscience, 2017, 31(4): 734-745.
- [49] ZHANG Fengqi, WU Hongxiang, DILEK Y, et al. Guadalupian (Permian) onset of subduction zone volcanism and geodynamic turnover from passive- to active-margin tectonics in Southeast China [J]. GSA Bulletin, 2020, 132(1/2): 130-148.
- [50] 程克明, 王兆云, 熊英, 等. 中国海相碳酸盐岩的生烃研究 [J]. 海相油气地质, 1999, 4(4): 1-11.
- CHENG Keming, WANG Zhaoyun, XIONG Ying, et al. Research on hydrocarbon generation of marine carbonate rocks in China [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 1999, 4(4): 1-11.
- [51] 李志鹏. 中上扬子五峰组页岩有机质丰度恢复及评价 [J]. 特种油气藏, 2015, 22(2): 13-17.
- LI Zhipeng. Shale organic matter abundance recovery and evaluation of Wufeng Formation in Middle-Upper Yangtze [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2015, 22(2): 13-18.
- [52] 陈学国. 准噶尔盆地石炭系高—过成熟烃源岩有机质丰度恢复研究新进展 [J]. 新疆地质, 2013, 31(4): 324-327.
- CHEN Xueguo. Restoration of organic abundance for high-over mature source rocks of Carboniferous in Junggar Basin [J]. Xinjiang Geology, 2013, 31(4): 324-327.